تحلیل حساسیت متغیرهای عملیات حرارتی بر خواص آلیاژ آلومینیم سرسیلندر به‌روش رگرسیون*

محمدجعفر شریفی[۱] محمد آزادی[۲] محبوبه آزادی[۳]

چکیده

در این مقاله به‌روش تحلیل رگرسیون، الگوهای مناسبی برای سختی و ریزساختار آلیاژ آلومینیم سرسیلندر ارائه شده است. توابع هدف، سختی، اندازهٔ فازها و میزان کروی‌بودن و متغیرها در آزمایش‌های تجربی شامل دما و زمان انحلال و پیرسازی انتخاب شدند. نتایج نشان داد که بیشینه سختی (۱٦٤ویکرز) زمانی به‌دست می‌آید که نمونه ۳۰۰دقیقه در دمای ۵۱۰ °C قرار گیرد و سپس، در دمای ۱۷۵ °C به‌مدت ۳٦۰دقیقه پیرسخت شود. همچنین، عملیات حرارتی بهینه برای دستیابی به کمترین اندازهٔ مساحت فازها و کروی‌تربودن فازها مشخص شد. نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد که زمان پیرسختی مؤثرتر از دما در تغییرات سختی است و دمای انحلال نسبت به دمای پیرسختی فاکتور مهم‌تری محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیم، تحلیل حساسیت، عملیات حرارتی، ریزساختار، سختی.

Sensitivity Analysis of Heat Treatment Parameters on Cylinder-head Aluminum Alloy Properties by Regression Method

M. Jafar Sharifi M. Azadi M. Azadi

Abstract

In this article, by the regression analysis, suitable patterns for the hardness and the microstructure of the cylinder-head aluminum alloy have been presented. Objective functions were the hardness, the phase size and the spherical degree and variables were selected as the temperature and the time for the solution and ageing, in experiments. Results showed that the highest hardness (164 VHN) obtained when the sample was heated at 510°C for 300 minutes; then, aged for 360 minutes at 175°C. The optimal heat treatment was determined to achieve the smallest value of the phase area, as well as a higher amount of spherical phases. Results of the regression analysis demonstrated that the ageing time was more effective than the temperature in hardness variations, and the solution temperature was more important than the ageing temperature.

Key Words Aluminum Alloy, Sensitivity Analysis, Heat Treatment, Microstructure, Hardness.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۲/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱۲/۱۹ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان.

(۲) دانشیاردانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان.

(۳) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان

Email: m.azadi@semnan.ac.ir.

DOI: 10.22067/ma.v32i1.80171

مقدمه

امروزه آلیاژهای آلومینیم به‌طور گسترده در ساخت قطعات موتور استفاده می‌شوند، ازاین‌رو، تحقیقات زیادی برای بهبود خواص مکانیکی این آلیاژها انجام شده است. از مهم‌ترین قطعاتی که در خودروهای سواری با آلیاژهای آلومینیم ساخته می‌شود، سرسیلندر است. از آنجا که سرسیلندر زیر بارهای مختلف مکانیکی و حرارتی قرار دارد، به بررسی استحکام آن بسیار توجه شده است که در ذیل به برخی از این بررسی‌ها پرداخته می‌شود.

لی (Li) و همکارانش [1]، به بررسی تأثیر میزان آهن موجود در آلیاژ آلومینیم ۳۱۹ پرداختند. این آلیاژ برای ساخت سرسیلندر در شرکت خودروسازی پژو سیتروئن فرانسه استفاده می‌شود. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که افزایش میزان آهن، باعث کاهش استحکام ماده در برابر ایجاد و رشد ترک شده است. منرگس (Menargues) و همکارانش [2]، عملیات حرارتی انحلال را برای کاهش اندازهٔ فاز سیلیسیم و همچنین فازهای غیرقابل حل در آلیاژهای A356 و A357 ارائه کردند که شامل زمان ۳۰دقیقه و دمای ۵٤۰ °C است که موجب ایجاد فازهای ریزتری نسبت به روش‌های عملیات حرارتی مرسوم می‌شود و بر خواص مکانیکی تأثیرگذار است. آزادی و همکارانش [3]، عملیات‌های پیرسازی مختلفی را روی آلیاژ آلومینیمی پیستون انجام و نشان دادند که در این عملیات حرارتی اندازهٔ فاز سیلیسیم و سختی افزایش پیدا می‌کند. بیرل (Beroual) و همکارانش [4]، به بررسی تأثیر عملیات حرارتی روی آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم–مس و آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم–منیزیم پرداختند. نتایج نشان داد برای دستیابی به بیشترین استحکام آلیاژ حاوی منیزیم، زمان انحلال و پیرسازی باید افزایش یابد. لیو (Liu) و همکارانش [5]، نشان دادند که با انجام عملیات حرارتی T6 می‌توان استحکام برشی نمونه‌های آلومینیمی از جنس A356 و آلیاژ ٦۱۰۱ را که به‌روش ریخته‌گری کوبشی ساخته شده است، افزایش داد. لی و همکارانش [6]، اثر عملیات‌های حرارتی مختلف را بر استحکام و چقرمگی شکست آلیاژ 7N01 بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که عملیات حرارتی T6 باعث افزایش استحکام آلیاژ می‌شود، ولی چقرمگی شکست ماده را کاهش می‌دهد. لونا (Luna) و همکارانش [7]، گزارش کردند که با انجام یک عملیات حرارتی چندمرحله‌ای روی آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم–مس–منیزیم می‌توان خواص مکانیکی ماده را به میزان چشمگیری افزایش داد، همچنین نشان دادند که با انجام عملیات انحلال چندمرحله‌ای می‌توان به خواص مکانیکی بهتر در زمان کمتری نسبت به عملیات‌های حرارتی مرسوم دست یافت. یو (Yu) و همکارانش [8]، اثر عملیات حرارتی T6 را بر رفتار شکست آلیاژ A390 مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نمونه‌های عملیات حرارتی‌شده دارای فازهای گردتری نسبت به نمونه‌های بدون عملیات حرارتی بوده و همچنین چقرمگی شکست آن‌ها بیشتر است. سچیل (Cecchel) و همکارانش [9]، اثر عملیات حرارتی بر آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم–مس را بررسی و گزارش کردند که انتخاب عملیات حرارتی مناسب می‌تواند تا ۵۰درصد استحکام تسلیم و تا ۹۰درصد میزان چکش‌خواری آلیاژ را افزایش دهد. بهمنی و همکارانش [10]، نشان دادند که با افزودن ذرات کاربید سیلیسیم به مقدار ۱درصد وزنی به آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم، بیشترین سختی و همچنین با افزودن ۱/۵درصد وزنی به آلیاژ، بیشترین مقدار مقاومت سایشی را می‌توان به‌دست آورد. وندرلویس (Vandersluis) و همکارانش [11]، پس از بررسی ۲نوع عملیات حرارتی بر سرسیلندرهای خودرو سواری و مقایسه ریزساختار آن‌ها، گزارش کردند که بهترین عملیات حرارتی برای آلیاژ استفاده‌شده آن‌ها عملیات T7 است، زیرا باعث کوچک‌ترشدن اندازهٔ فاز Al_2Cu می‌شود. کای (Cai) و همکارانش [12]، اثر مقدار متفاوت نیکل موجود در آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم را در عملیات حرارتی T6 بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین استحکام خستگی زمانی به‌وجود خواهد آمد که ۲/۵درصد نیکل در آلیاژ موجود باشد. هوآنگ (Huang) و همکارانش [13]، در تحقیق خود به اثر افزودن عناصر هافنیم و زیرکونیم روی

استحکام آلیاژ آلومینیم-سیلیسیم پرداختند. آن‌ها ابتدا نمونه‌های خود را در عملیات حرارتی T6 قرار دادند و پس از انجام آزمون‌های کشش و استحکام، مشخص شد که افزودن هم‌زمان هردو عنصر به آلیاژ باعث افزایش استحکام می‌شود. نتایج تحقیق لی (Li) و همکارانش [14]، نشان داد که نمونه‌های عملیات حرارتی‌شدهٔ دارای فازهای کوچک‌تر، سختی بیشتر و استحکام کششی بیشتر نسبت به نمونه‌های بدون عملیات حرارتی دارند. گرت (Garat) و همکارش [15]، استحکام خزشی ۲ آلیاژ آلومینیم-سیلیسیم-مس و آلومینیم A356 را که در ساخت سرسیلندر استفاده می‌شوند، بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن مقدار خاصی از منگنز و زیرکونیم همراه عملیات حرارتی T7 می‌تواند موجب افزایش عمر قطعه در برابر خزش، بدون کاهش خاصیت چکش‌خواری شود. پزدا (Pezda) [16]، به بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر آلیاژ A320 پرداخت و گزارش کرد که عملیات حرارتی بر مقدار سختی ماده اثر بسیار زیادی دارد و با انتخاب عملیات حرارتی مناسب می‌توان سختی این آلیاژ را تا ۱/۷برابر افزایش داد. دی‌جیوانی (Di Giovanni) و همکارانش [17]، نشان دادند که با افزودن مقداری مس به آلیاژ A356 و انجام عملیات حرارتی می‌توان خواص مکانیکی و حرارتی آن را به میزان چشمگیری افزایش داد. کارس (Kores) و همکارانش [18]، گزارش کردند که تأثیر عملیات حرارتی بر خواص آلیاژ سرسیلندر بسیار زیاد است، به‌نحوی که می‌تواند استحکام آلیاژ را تا دوبرابر مقدار اولیه آن افزایش دهد.

لازم به ذکر است که روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی مواد براساس ریزساختار وجود دارد. در ابتدا به کمک روش‌هایی مانند پراش پرتوایکس [19-20]، پراش پرتونوترون زاویه کوچک [21] و روش گرماسنجی روبشی تفاضلی [22,23]، خواص شیمیایی و میزان حضور فازها مشخص می‌شود. از روش‌های تحلیلی مانند تحلیل فاکتور انحلال (Quench Factor Analysis) یا حتی روش اصل اساسی ترمودینامیکی (Thermodynamic Extremal Principle) برای محاسبهٔ خواص مکانیکی مواد استفاده می‌شود [24-26]. در روش تحلیل فاکتور انحلال خواص مکانیکی آلومینیم برپایهٔ نحوهٔ سردسازی قابل محاسبه است [27-29]. در این روش سختی ماده براساس یک رابطهٔ ریاضی محاسبه می‌شود و به متغیرهایی همچون نرخ سردسازی، دما و زمان پیرسازی توجه می‌شود، ولی درباره تأثیر فازها، سایر متغیرهای عملیات حرارتی و ارتباط آن با تابع هدف، یعنی سختی، تحلیل مستقیمی انجام نمی‌شود که این عامل یکی از محدودیت‌های این روش محسوب می شود [30]. همچنین بیشتر روش‌های موجود برای تحلیل خواص مکانیکی معمولا محدود به فرایند خاصی هستند. ازاین‌رو، استفاده از روش رگرسیون می‌تواند به طراحان و پژوهشگران اجازه دهد که بدون وجود محدودیت خاصی، همهٔ متغیرهای مدنظر را بر توابع هدف بررسی کنند. به‌طورکلی در استفادهٔ صنعتی از آلومینیم، همواره نیاز است که رابطهٔ مستقیمی میان زمان و دما، عملیات حرارتی و خواص مکانیکی آن همواره مشخص باشد [31]. بنابراین استفاده از روش رگرسیون می‌تواند نسبت به روش‌های دیگر برای مقاصد صنعتی مناسب‌تر و سریع‌تر باشد [32-34]. روش رگرسیون نسبت به روش‌های دیگر طراحی آزمون‌ها دارای محدودیت کمتری است. به‌عنوان مثال در روش تاگوچی نمی‌توان اثرات متقابل برخی متغیرها را بررسی کرد و فقط یک تابع خطی (درجه اول) برای تحلیل لحاظ می‌کند [35]. در روش طراحی کامپوزیت مرکزی (Central Composite Design) که از روش‌های متداول طراحی آزمون‌هاست، به ٤ سطح برای انجام تحلیل نیاز است که باعث افزایش تعداد آزمون‌ها می‌شود [36]، حال آن‌که در روش تحلیل رگرسیون هیچ‌گونه محدودیتی در تعداد سطوح آزمون وجود ندارد و بدون طراحی اولیهٔ آزمون، می‌توان بر روی هرگونه خروجی‌ای تحلیل انجام داد. روش سیستم استنتاج فازی- عصبی تلفیقی (Adaptive Neuro-fuzzy Inference System) برای پیش‌بینی و تحلیل آزمون‌ها با دقت

زیاد نیز وجود دارد که در این روش تحلیل‌ها در ۵ سطح انجام می‌شود، همچنین در این روش تعداد نمونه‌های آزمون و فرایند حل نسبت به روش رگرسیون بیشتر است [37]. بنابراین محققان بسیاری از روش رگرسیون برای تحلیل خواص مکانیکی مواد بهره گرفتند که در ذیل به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

آزادی و همکارانش [38]، در تحقیقی به کمک روش طراحی آزمون‌ها، میزان تأثیر متغیرهای نرخ جابه‌جایی و فرکانس بارگذاری را بر عمر خستگی کم چرخه و بیشینه تنش ماده مرکب بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که فقط نرخ جابه‌جایی بر هردو متغیر مدنظر تأثیرگذار است. ویمبو (Vembu) و گانسن (Ganesan) [39]، از روش رگرسیون برای بررسی تأثیر متغیرهای عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم استفاده کردند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که زمان انحلال تأثیر بیشتری بر خواص مکانیکی نسبت به متغیرهای دیگر دارد. کرسیکیان (Karthikeyan) و کومار(Kumar) [40]، گزارش کردند که می‌توان با استفاده از روش رگرسیون تأثیر متغیرهای مرتبط با ریخته‌گری را روی خواص آلیاژ آلومینیمی به‌خوبی پیش-بینی کرد. صفرلو و همکارانش [41]، در تحقیقی نشان دادند که می‌توان به‌روش رگرسیون میزان سختی سوپرآلیاژ پایه‌نیکل را با دقت زیادی پیش‌بینی کرد و براساس آن عملیات حرارتی بهینه را مشخص کرد.

پس از بررسی تحقیقات دراین‌زمینه، مشخص شد که به استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها (تحلیل رگرسیون) برای رسیدن به یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی و همچنین نشان‌دادن تأثیر عملیات حرارتی روی آلیاژ سرسیلندر کمتر توجه شده است. ازاین‌رو، در این مقاله ۲متغیر دما و زمان عملیات حرارتی (انحلال و پیرسازی)، با تابع هدف سختی، اندازهٔ فاز سیلیسیم و Al_2Cu در آلیاژ آلومینیم- سیلیسیم- مس و همچنین میزان کروی‌بودن آن‌ها بهینه شده است.

مواد و آزمون‌ها

آلیاژ مطالعه‌شده در این مقاله، از متداول‌ترین آلیاژها برای ساخت قطعه سرسیلندر خودروهای سواری است. درصد عناصر موجود در این آلیاژ در جدول ۱ به‌وسیلهٔ آزمون کوانتومتری نشان داده شده است. نمونه‌ها به‌روش ریخته‌گری گردابی ساخته شدند و همچنین برای افزایش کیفیت نمونه‌ها، فرایند گاززدایی و پیش‌گرم‌سازی قالب انجام شد. دمای ریخته‌گری براساس نتایج منابع [42]، ۷۴۵ °C انتخاب شد.

جدول ۱ درصد عناصر آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم–مس

نام عنصر	درصد عنصر	نام عنصر	درصد عنصر
Al	Bal.	Zn	۰/۰۷
Si	۷/۲	Sn	۰/۰۱
Cu	۳/۵	Ti	۰/۰۱
Mg	۰/۲۶	Ni	۰/۰۱
Mn	۰/۳۷	Fe	۰/۴۲

باتوجه‌به نمودار هم‌دما فازی آلومینیم–سیلیسیم–مس که برای آلیاژهای حاوی ٦درصد سیلیسیم است، مشخص می‌شود که دمای نقطهٔ یوتکتیک یا آغاز شروع فاز مایع نزدیک به دمای ۵۲۵ °C است [43]. ازاین‌رو، بازه‌ایی گسترده برای اعمال حرارت بر نمونه‌ها تا نزدیک به نقطهٔ یوتکتیک برای آزمایش‌های تجربی تعیین شد. دماهای انحلال براساس تاریخچه تحقیق و نمودار فازی از ٤٩۰ تا ۵۱۰ °C انتخاب شد و برای بررسی تأثیر پیرسازی بر سختی و ریزساختار، دما از ۱۷۵ تا ۲۵۰ °C انتخاب شد که در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های شمارهٔ ۳ و ۷ برخلاف نمونه‌های دیگر در آب ۹۰ °C (آب داغ) سرد شدند. همچنین زمان‌های انتخابی برای گرمایش قطعات نیز در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر زمان انحلال و پیرسازی در برخی نمونه‌ها، از زمان پیرسازی یا انحلال یکسانی استفاده شده است و علت این کار بیشترکردن دقت نمودارها و توابع در این نواحی است که به‌روش طراحی آزمون‌ها به‌دست می‌آید.

جدول ۲ نحوهٔ شماره‌گذاری نمونه‌ها در شرایط مختلف عملیات حرارتی

شمارهٔ نمونه	دمای انحلال (°C)	زمان انحلال (دقیقه)	دمای پیرسازی (°C)	زمان پیرسازی (دقیقه)
۱	–	–	–	–
۲	۵۱۰	۳۰۰	–	–
۳	۵۰۰	۳۳۰	–	–
٤	۵۰۰	۳۰۰	–	–
۵	٤۹۰	۳۰۰	–	–
٦	۵۱۰	۳۰۰	۱۷۵	۳٦۰
۷	۵۰۰	۳۳۰	۲۵۰	۲۷۰
۸	۵۰۰	۳۰۰	۱۸۰	۱۲۰
۹	۵۰۰	۳۰۰	۱۸۰	۱۸۰
۱۰	۵۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۲۰
۱۱	٤۹۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۸۰

برای بررسی تصاویر میکروسکوپی، ابتدا نمونه‌ها با سنبادهٔ ۲۰۰۰ صیقلی و با پودر آلومینا با ذرات ۰/۳میکرومتر پولیش شدند. از محلول کلر نیز برای حکاکی نمونه‌ها استفاده شد [13,14]. همچنین برای بررسی دقیق‌تر تصاویر میکروسکوپی، از نرم‌افزار تحلیل تصویر (ImageJ) استفاده شد. متغیرهای مطالعه‌شده به کمک این نرم‌افزار شامل اندازهٔ فازهای مدنظر و همچنین میزان کروی‌بودن آن‌هاست. برای بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر سختی نمونه‌ها، آزمون سختی‌سنجی ویکرز انجام شد. نیروی اعمالی دستگاه معادل ۳۰کیلوگرم انتخاب شد. تکرارپذیری آزمون سختی برای هر نمونه، ۵بار بوده است. این نقاط به‌صورت تصادفی در مناطق مختلف سطح هر نمونه انتخاب شده است.

تحلیل حساسیت با تحلیل رگرسیون

تحلیل رگر سیون شامل روش‌های مختلفی برای مدل سازی و پیش‌بینی توابع هدف براساس متغیرهای ورودی است. در این روش متغیرها می‌توانند به‌صـــورت متغیرهای خاص و منحصربه‌فرد یا به صورت متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل تعریف شوند. تحلیل رگرسیون به‌طور ویژه مشخص می‌کند که هر متغیر چگونه و به چه میزان در تابع هدف تأثیرگذار ا ست. همچنین در صورت تغییر یکی از متغیرها، متغیرهای دیگر چقدر تغییر می‌کنند و این تغییر چه تأثیری بر تابع هدف نهایی خواهد دا شت. تحلیل رگر سیون توانایی مناسبی در ارائه پیش‌بینی از رفتار ماده دارد [44].

پس از به‌دست‌آوردن اطلاعات حاصل از آزمون‌های تجربی، تحلیل صحیح و استفاده حداکثری از نتایج به‌دست‌آمده، از مهم‌ترین بخش‌های هر تحقیق است. با روش طراحی آزمون‌ها می‌توان تأثیر هر یک از متغیرهای دخیل در آزمون را بر نتیجه آزمون پیدا کرد. علاوه‌براین، به‌کمک این روش می‌توان بهینه‌ترین حالت‌های ممکن را در آزمون‌های مختلف مشخص کرد. روش استفاده‌شده در این تحقیق تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل‌های آماری است. در این روش، ابتدا میانگین مربعات (MS) اثر شامل متغیر مدنظر ($MS_{treatment}$) و خطا (MS_{error}) اندازه‌گیری می‌شود. هدف نهایی در این روش به‌دست‌آوردن حساسیت اثر باتوجه‌به روابط (۱) و (۲) است. درنهایت مقدار به‌دست‌آمده با مقدار مرجع ($F_{a,a-1,N-a}$) مقایسه خواهد شد [44].

$$F_0 = \frac{MS_{tratment}}{MS_{error}} \quad (۱)$$

$$F_0 > F_{a,a-1,N-a} \quad (۲)$$

برای م شخص شدن مقدار $F_{a,a-1,N-a}$، باید از جدول‌های آماری ا ستفاده شود. در این تحقیق مقدار سطح ری سک a، برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شـــده اســـت. همچنین ضـــریب اطمینان طراحی آزمون‌ها نیز ۹۵درصـــد در نظر گرفته شـــده است. مقدارهای a-1 و N-a نیز نشان‌دهنده درجه آزادی اثر و خطا هســـتند. روابط فوق برای یک اثر قابل اجراســـت. همچنین لازم بـــه ذکر اســـت کـــه این روابط قـــابلیـــت گســـترش‌دادن برای بررســـی چندین اثر را نیز دارا هســـتند [44]. تمام تحلیل‌های اســـتفاده‌شـــده در این مقاله به‌کمک نرم‌افزار تحلیل آماری (MINITAB) انجام شده ا ست. پس از تحلیل حســاســیت، با اســتفاده بعد از تحلیل رگرســیون

به‌کمک نرم‌افزار، تابعی برا ساس متغیرهای مدنظر (, P_1, P_2 ...) برای تخمین میزان سختی (H) ارائه شده است.

$$H = C_0 + C_1P_1 + C_2P_2 + C_3P_1P_2 + \cdots \quad (۳)$$

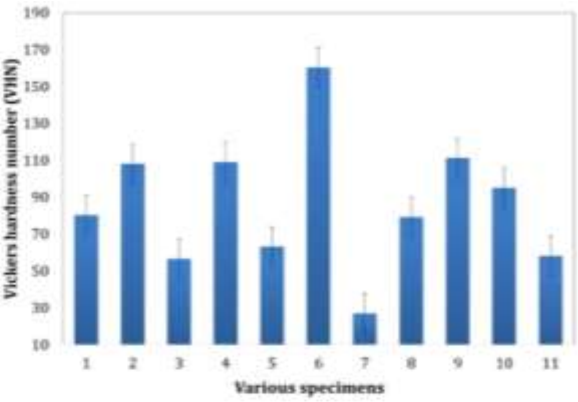
پس از تطبیق رابطهٔ فوق با نتایج تجربی به‌دست‌آمده، ضرایب ثابت رابطهٔ (۳)، $(C_0, C_1, \ldots)$ مشخص خواهند شد. در این تحقیق، ضریب ثابت، توان اول و همچنین توان دوم و اثرات متقابل آن‌ها (به‌صورت ضرب در یکدیگر) در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش سختی‌سنجی

نتایج حاصل از آزمون سختی‌سنجی در شکل ۱ نشان داده شده است. بیشترین میزان سختی در مرحله انحلال زمانی رخ می‌دهد که آلیاژ استفاده‌شده در دمای °C ۵۰۰ به‌مدت ۳۰۰دقیقه (نمونهٔ شمارهٔ ٤) قرار داشته باشد که در آن زمان و دمای عملیات انحلال کمینه بوده است. نتایج مشابهی از سوی مرجع [45] نیز گزارش شده است که با افزایش زمان عملیات حرارتی در دمای °C ۵۰۰، میزان سختی کاهش خواهد یافت که علت این رویداد کاهش مقدار فاز سیلیسیم است. کمترین مقدار سختی در مرحلهٔ انحلال هنگامی رخ می‌دهد که نمونهٔ بررسی‌شده در دمای °C ۵۰۰ به‌مدت ۳۳۰دقیقه (نمونهٔ شمارهٔ ۳) قرار داده شده باشد. همچنین گزارش شده است زمان بیشتر عملیات حرارتی انحلال، موجب حل‌شدن بیشتر رسوبات همچون فازهای بین‌فلزی در زمینه آلومینیمی خواهد شد [46]، البته دما نسبت به زمان عامل مؤثری‌تری است که وابسته به نوع عناصر موجود در آلیاژ است. به عبارتی دیگر، ممکن است با تغییر نوع و درصد عناصر آلیاژی موجود در زمینه، تغییر در فازهای حاصل رخ دهد که همین عامل موجب تغییر تأثیر دمای عملیات بر رفتار آلیاژ شود. به‌عنوان مثال هنگامی که میزان مس آلیاژ آلومینیم افزایش یابد، فاز Al_2Cu در زمینهٔ آلیاژ بیشتر مشاهده می‌شود که در نتیجه آن، سختی و خواص مکانیکی آلیاژ در اثر عملیات حرارتی در دمای ثابت، رفتار بسیار متفاوت و متغیر از خود نشان می‌دهد [47]. پس از انجام سختی‌سنجی نمونه‌های پیرسازی‌شده، مشخص شد که بیشترین سختی متعلق به نمونهٔ شمارهٔ ٦ است. این نمونه در دمای °C ۱۷۵ به‌مدت ۳٦۰دقیقه قرار گرفته بود. کمترین مقدار سختی نیز، در دمای °C ۲۵۰ به‌مدت ۲۷۰دقیقه (نمونهٔ شمارهٔ ۷) گزارش می‌شود.

در مطالعات دیگر محققان [49-48] نیز م شخص شده ا ست که با انجام عملیات حرارتی T6 در بازه دمایی ۱۵۵ تا °C ۲۲۰ همواره بی شترین مقدار سختی در نزدیکی °C ۱۸۰ م شاهده خواهد شد. همچنین گزارش شده ا ست افزایش دمای پیرسازی و کاهش دمای انحلال باعث کاهش میزان سختی خوا هد شد. ع لت افزایش سختی، تغییرات ریزساختاری ماده همچون افزایش انسجام فازها، افزایش میزان کروی‌بودن آن‌ها و تغییر اندازهٔ فاز سیلیسیم در اثر تغییر روند عملیات‌های حرارتی است [16].

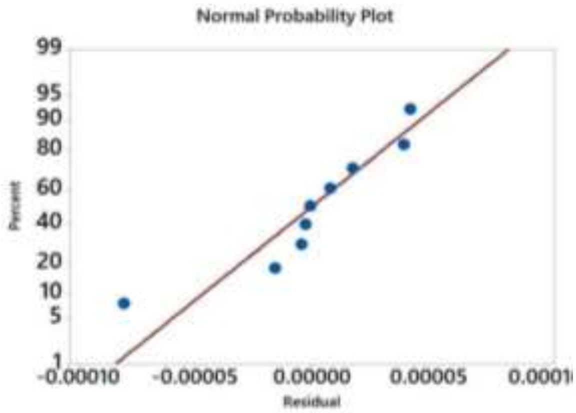


شکل ۱ نمودار سختی میانگین برای همهٔ نمونه‌ها

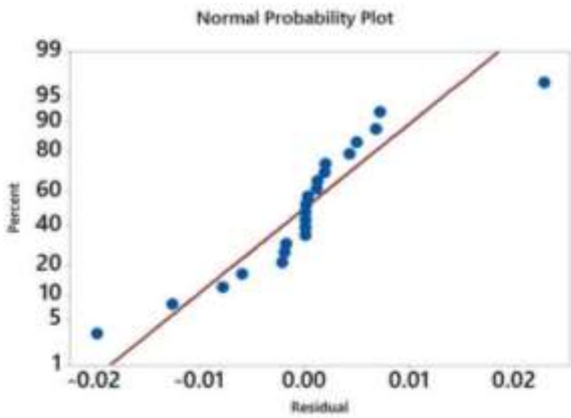
تحلیل حساسیت برای سختی

گفتنی است که چون هدف تحقیق بررسی اثرات عملیات حرارتی روی خواص نمونه‌ها بوده است، تأثیرات انحلال به‌صورت جداگانه نیز در کنار تأثیر انحلال و پیرسازی روی همهٔ آزمون‌ها برر سی شده ا ست. در اولین بخش از تحلیل نتایج رگرسیون، نتایج باقی‌مانده شامل احتمال نرمال انحراف نتایج شبیه‌سازی براساس تابع رگرسیون انتخاب‌شده با نتایج تجربی حاصل از آزمون سختی برای عملیات حرارتی در

شکل ۲ آورده شده است که میزان سختی بر اثر انجام عملیات حرارتی افزایش پیدا کرده است. در نمونه‌هایی که در آب ۹۰ °C سرد شده‌اند، سختی به‌شدت کاهش یافته است، بنابراین این نتایج باعث ایجاد ناپیوستگی در نمودارهای رگرسیون می شوند. برای حل این مشکل، نتایج مربوط به این نمونه‌ها جداگانه در جدول ۳ گزارش شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ نحوۀ توزیع نرمال داده‌های اندازه‌گیری براساس مقدار سختی شامل (الف) انحلال و (ب) انحلال و پیرسازی

جدول ۳ مقادیر میانگین سختی و انحراف معیار برای انحلال سردسازی‌شده در آب داغ

شمارۀ نمونه	نوع عملیات	میانگین سختی (ویکرز)	انحراف معیار
۳	انحلال	٥٦/٤	٥/٢
۷	انحلال و پیرسازی	۲۷	۰/۰

روابط رگرسیون به‌دست‌آمده برای سختی برپایۀ متغیرهای دمای انحلال (T_s)، دمای پیرسازی (T_a) و زمان پیرسازی (t_a)، برای نمونه‌های تحت فرایند انحلال قرارگرفته در رابطۀ (٤) و برای نمونه‌هایی که تحت انحلال و پیرسازی قرار گرفته‌اند در رابطۀ (٥) نشان داده شده‌اند:

$$H^2 = -0.1706 + 0.000674T_s - 0.000001\,T_s^2 \quad (٤)$$

$$H^2 = -19074106 + 75799\,T_s + 120.5T_a + 97.3t_a - 75.4T_s^2 \quad (٥)$$

در ادامه، میزان دقت، میزان تأثیر (T-Value) و حساسیت (P-Value) هر متغیر در روابط به‌دست‌آمده از تحلیل رگرسیون (روابط ٤ و ٥) در جدول‌های ٤ و ٥ نشان داده شده است. با مدنظر قراردادن توضیحات مرجع [50]، مقدار P-Value باید کمتر از ۰/۰٥ باشد تا آن اثر در تابع هدف، مؤثرتر و تأثیرگذاری بیشتری داشته باشد.

جدول ٤ مقادیر دقت و حساسیت متغیرها در تابع رگرسیون برای انحلال

Part	T-Value	P-Value	R^2
Regression	١٤/٣٠	٠/٠٠٥	٨٢/٦٦
T_s	٢٣/٤٩	٠/٠٠٣	
T_s^2	٥/١٠	٠/٠٦٥	

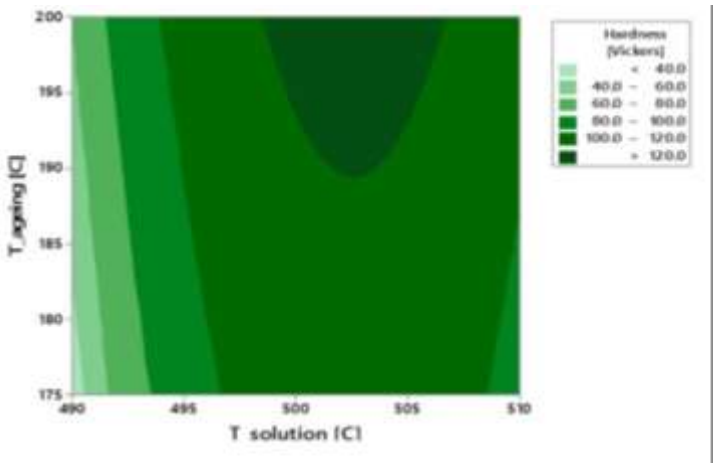
جدول ٥ مقادیر دقت و حساسیت متغیرها در تابع رگرسیون برای پیرسازی

Part	T-Value	P-Value	R^2
Regression	٥٣/٨٦	٠/٠٠٠	٩٣/٩٠
T_s	٤/٠٧	٠/٠٦٣	
T_a	٢/٢٧	٠/١٥٤	
t_a	١٣/٢٨	٠/٠٠٣	
T_s^2	٣/٩٩	٠/٠٦٦	

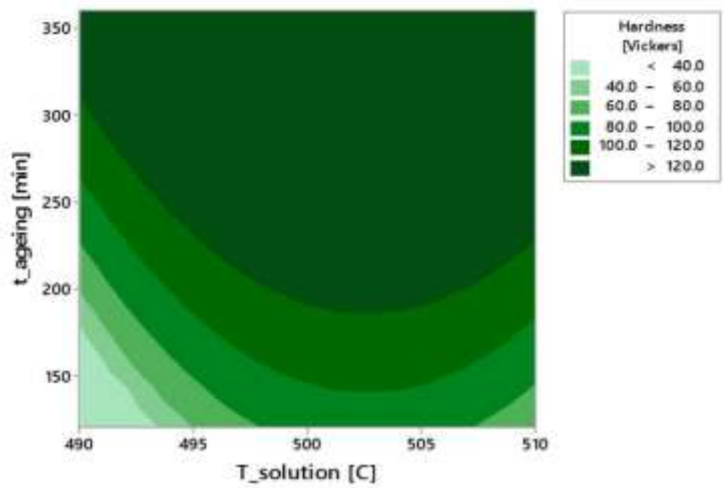
از مقایسۀ مقادیر P-Value برای ۲تابع رگرسیون رسم‌شده مشخص شد که با درنظرگرفتن عملیات پیرسازی،

میزان حساسیت به دمای انحلال در تابع مربوط به پیرسازی کم می‌شود. در ادامه، با بررسی مقادیر T-Value به‌دست‌آمده مشخص شد که در تابع مربوط به انحلال، بیشترین تأثیرگذاری مربوط به توان اول درجه حرارت است، درحالی‌که برای تابع پیرسازی، بیشترین تأثیرگذاری مربوط به متغیر توان اول دمای پیرسازی و بعد از آن با اختلاف نسبتاً زیادی متغیر توان اول دمای انحلال است. همچنین با اضافه‌شدن عملیات پیرسازی به نمونه‌ها، میزان دقت اندازه‌گیری (R^2) تابع رگرسیون به‌شدت افزایش پیدا کرد و مقدار آن به عدد ۱ نزدیک‌تر شده است. براساس تابع رگرسیون انحلال، متغیر توان اول دمای انحلال مؤثر تشخیص داده شده است و برای تابع رگرسیون پیرسازی، فقط دمای پیرسازی مؤثر است.

در ادامه این بخش، نحوه تغییر مقادیر سختی براساس دما و زمان فرایندهای انحلال و پیرسازی در شکل‌های ۳ و ٤ نشان داده شده‌اند. این نمودارها برپایهٔ پیش‌بینی رگرسیون رسم شده است، ولی با استفاده از داده‌های تجربی می‌توان مشخص کرد که مقادیر پیش‌بینی‌شده در این شکل‌ها دقت زیادی دارند. باتوجه‌به تصاویر برای سختی، دمای ۵۱۰ °C دمای مناسبی برای عملیات انحلال است. همچنین، دمای ۱۷۵ °C برای پیرسختی درراستای دستیابی به سختی بیشتر مناسب است، زیرا در این دماها مساحت فاز سیلیسیم کمتر شده است و به‌صورت همگن‌تری در کل زمینه پخش شده است.



شکل ۳ تغییرات مقدار سختی براساس دمای انحلال و پیرسازی



شکل ٤ تغییرات مقدار سختی براساس دمای انحلال و زمان پیرسازی

اکنون به‌کمک تابع رگرسیون به‌دست‌آمده برپایهٔ نتایج تجربی، مقدار بیشینه و کمینهٔ سختی پیش‌بینی‌پذیر است. این نتایج در جدول ٦ برای مقادیر سختی بیشینه ۱۸۰ویکرز و سختی کمینه ۲۷ویکرز گردآوری شده است که مقدار سختی کمینه به مقدار محاسبه‌شده برای نمونهٔ شمارهٔ ۷ نزدیک است. این نتایج نشان می‌دهند که تأثیر عملیات پیرسازی در دمای ۱۷۵ °C بر افزایش سختی درست بوده است و این نتایج مطمئن‌اند. همچنین پیش‌بینی می‌شود که با افزایش زمان قرارگرفتن در این دما، میزان سختی نیز افزایش بیشتری داشته باشد. کمترین میزان سختی در دمای ۵۰۰ °C برای نمونه‌ای که در آب داغ سرد شده است، مطابق نتایج تجربی در پیش‌بینی تئوری نیز کمترین میزان سختی را خواهد داشت. علت آن هم کاهش سختی در این دما به‌دلیل سردکردن در آب داغ است. در اثر این نوع سردکردن، امکان رشد فازها همچون فاز آلومینیم–مس وجود دارد که از یکپارچگی رسوبات جلوگیری می‌کند. لازم به ذکر است که سختی این فاز از سختی فاز سیلیسیم کمتر بوده است و موجب کاهش سختی می‌شود.

جدول ٦ پیش‌بینی بیشینه و کمینهٔ سختی

t_a (min)	T_a(°C)	t_s (min)	T_s(°C)	متغیر
۳٦۰	۲۵۰	۳۳۰	۵۱۰	بیشینهٔ مقدار تجربی
۳٦۰	۲۰۰	۳۰۰	۵۰۲	بیشینهٔ مقدار تئوری
۱۲۰	۱۷۵	۳۰۰	٤۹۳	کمینهٔ مقدار تجربی
۱۵۱	۲٤٤	۳۱۳	٤۹۱	کمینهٔ مقدار تئوری

در انتها می‌توان از نتایج حاصل از داده‌های تجربی و رگرسیون نتیجه گرفت که افزایش دمای پیرسازی باعث کاهش سختی خواهد شد، درحالی‌که افزایش زمان پیرسازی باعث افزایش مقدار سختی نمونه‌ها خواهد شد.

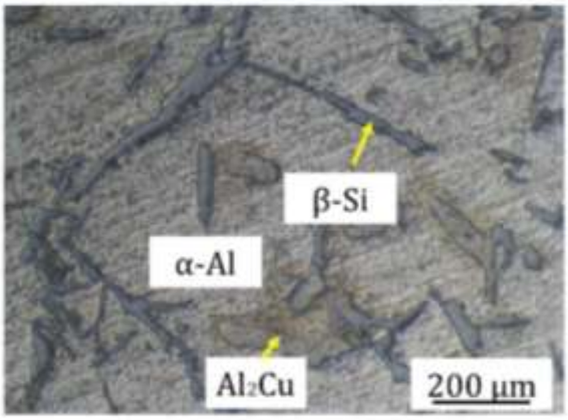
همچنین تابع رگرسیون رسم‌شده برای نمونه‌هایی که فقط تحت انحلال قرار گرفته‌اند نیز مقادیر بیشینه و کمینه محاسبه شد. بیشترین مقدار سختی در اثر انحلال در دمای °C ۵۰۵ و زمان ۳۰۰دقیقه برابر با ۱۸۱ویکرز به‌دست آمد. همچنین کمترین مقدار سختی ویکرز در دمای ٤۹۰ °C و زمان ۳۳۰دقیقه برابر ١٤ویکرز محاسبه شد. پس، انجام عملیات پیرسازی تأثیر بیشتری بر مقادیر به‌دست‌آمده برای سختی قطعات دارد. این بدین معنی است که توابع به‌دست‌آمده براساس داده‌های تجربی انحلال، نسبت به پیرسازی حساسیت بیشتری دارند.

بررسی ریزساختار

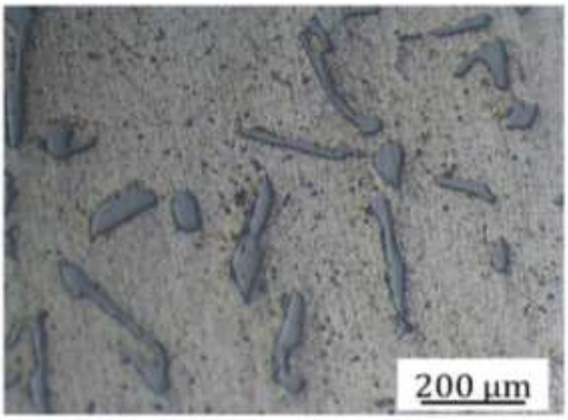
در شکل ۵ می‌توان تصاویر ریزساختار برخی نمونه‌ها را مشاهده کرد. نمونه‌های مشخص‌شده در این تصاویر، دارای فازهای سیلیسیم و آلومینیم–مس‌اند که در زمینه آلومینیم پراکنده شده‌اند. مشابه چنین ریزساختاری در مطالعات دیگر محققان نیز گزارش شده است [14,17].

از بررسی تصاویر میکروسکوپی مشخص شد که فاز سیلیسیم در حالت بدون عملیات حرارتی به‌صورت شاخه‌ای در آلیاژ وجود دارد، ازاین‌رو، برای افزایش استحکام مکانیکی، باید فاز یادشده به حالت گرد و با کمترین اندازه تبدیل شود [12,15]. همچنین فاز آلومینیم–مس (Al_2Cu) که کاهش آن بر عمر قطعات تأثیر مستقیمی دارد [51,16]، باید به‌صورت کمینه در آلیاژ درآید. همهٔ موارد یادشده با انتخاب یک عملیات حرارتی مناسب قابل دستیابی است. با کاهش اندازهٔ این فازها، تنش‌های ریزساختاری در اطراف آن‌ها کاهش محسوسی پیدا می‌کند. با انجام عملیات حرارتی انحلال، فاز آلومینیم–مس در زمینه انحلال پیدا می‌کند و در عملیات پیرسختی این فاز دوباره در زمینه رسوب پیدا می‌کند که باتوجه‌به زمان و دمای عملیات پیرسازی، اندازه و شکل این فاز متفاوت خواهد شد.

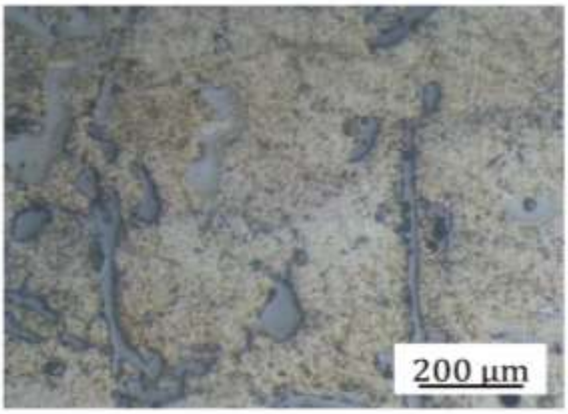
لازم به ذکر است که نتایج حاصل از نرم‌افزار تحلیل تصویری شامل اندازه و میزان کروی‌بودن ۲فاز سیلیسیم و آلومینیم–مس، در شکل‌های ٦ و ۷ گردآوری شده است. نتایج نشان می‌دهد که در همهٔ عملیات‌های حرارتی، فاز سیلیسیم نسبت به آلیاژ اولیه کاهش یافته است، ولی درباره فاز آلومینیم–مس نمی‌توان با قطعیت ز یادی نتیجه‌گیری مشخصی انجام داد. علت این موضوع هم وجود مس در این فاز است که این فاز را به‌شدت نسبت به هرگونه تغییر دمایی حساس می‌کند.



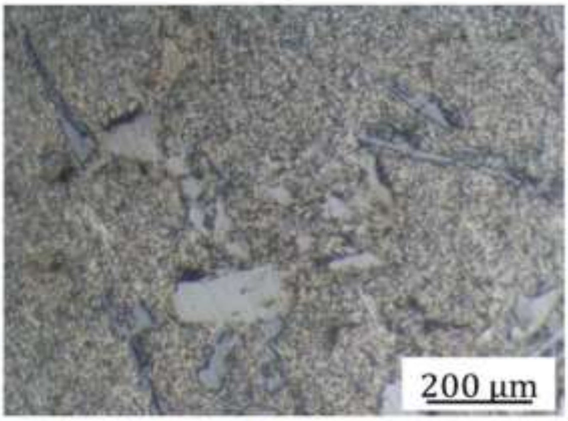
(الف)



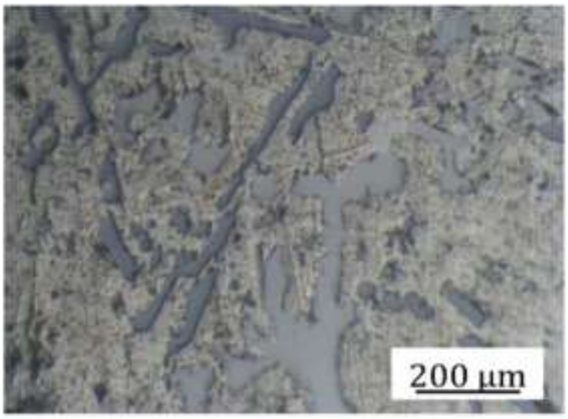
(ب)



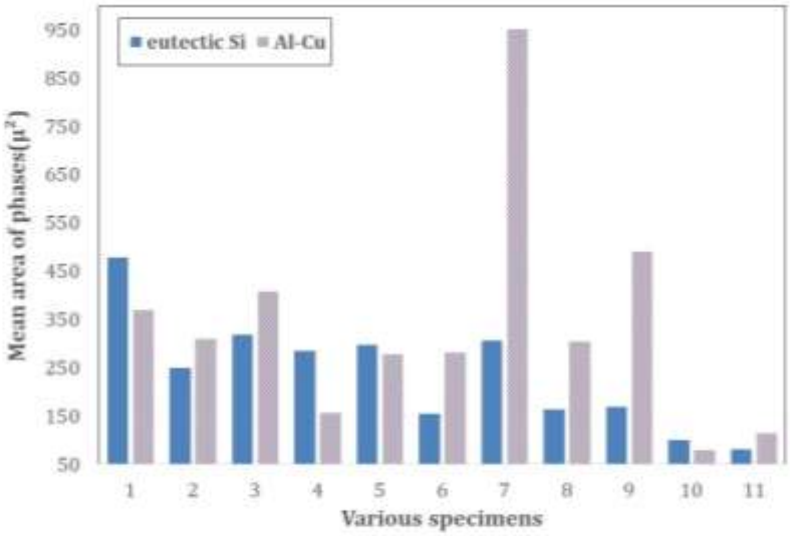
(ج)



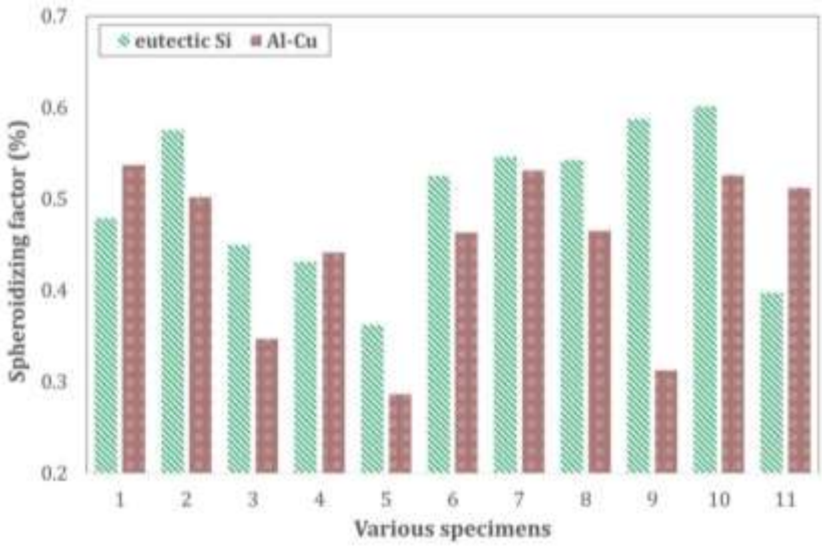
(د)



شکل ۵ ریزساختار میکروسکوپ نوری ماده برای (الف) نمونهٔ شمارهٔ ۱، (ب) نمونهٔ شمارهٔ ٤، (ج) نمونهٔ شمارهٔ ٦، (د) نمونهٔ شمارهٔ ۷ و (ه) نمونهٔ شمارهٔ ۹



شکل ٦ مساحت میانگین فازهای سیلیسیم و آلومینیم-مس



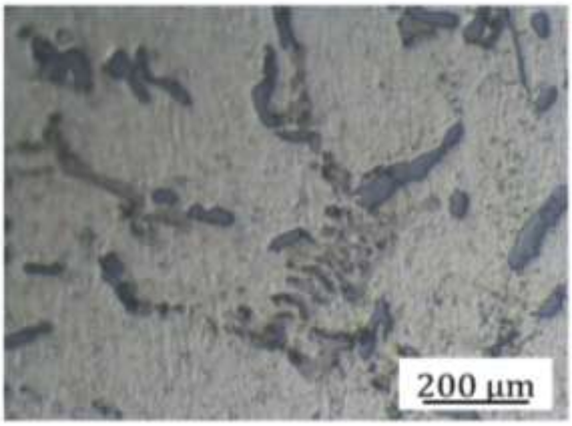
شکل ۷ میانگین فاکتور کروی‌بودن فازهای سیلیسیم و آلومینیم-مس

باتوجه‌به شکل ٦، نمونه شماره ۷ دارای بزرگ‌ترین مقدار میانگین مساحت فاز آلومینیم-مس است. زمانی تأثیر این اندازه بر خواص مکانیکی ماده مشخص می‌شود که از بخش قبل برای این نمونه سختی ۲۷ویکرز یا همان سختی کمینه که محاسبه و اندازه‌گیری شده است، توجه شود. درنتیجه افزایش مساحت این فاز باعث کاهش میزان سختی نمونه خواهد شد. همچنین نمونهٔ سردشده در آب داغ دارای بزرگ‌ترین اندازهٔ مساحت میانگین هردو فاز بررسی‌شده در میان نمونه‌های عملیات حرارتی‌شده هستند (نمونه‌های شمارهٔ ۳ و ۷). از مقایسهٔ اطلاعات شکل ٦ می‌توان دریافت که با عملیات پیرسازی در دمای ۲۵۰ °C روی نمونهٔ شمارهٔ ۳ می‌توان آن را به نمونهٔ شمارهٔ ۷ تبدیل کرد. این عمل باعث کاهش اندازه فاز سیلیسیم شده است، درحالی‌که این عملیات، مساحت فاز آلومینیم-مس را به‌شدت افزایش داده است.

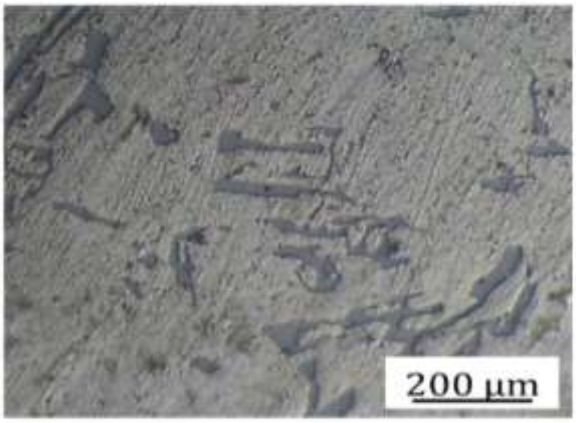
نمونهٔ شمارهٔ ۵ پس از قرارگرفتن در دمای ۲۰۰ °C به‌مدت ۱۲۰دقیقه به نمونهٔ شمارهٔ ۱۰ تبدیل شده است که حاصل این فرایند پیرسازی، کاهش بسیار زیاد اندازهٔ فازها و در طرف مقابل افزایش شدید میزان کروی‌بودن هریک از فازهای مطالعه‌شده است. بنابراین، این فرایند ازجمله مطلوب‌ترین فرایندهای بررسی‌شده در این تحقیق است.

نتایج تحلیل تصاویر نشان می‌دهد که کوچک‌ترین اندازهٔ فازها در نمونه‌های شمارهٔ ۱۰ و ۱۱ ایجاد شده‌اند. این نتایج در تحقیقات دیگر محققان [49] نیز برای آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم مشاهده شده است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که در این دما فاز سیلیسیم، ساختار ریزتر و کروی‌تری پیدا می‌کند. درنتیجه، عملیات پیرسازی در دمای ۲۰۰ °C در کاهش میانگین اندازهٔ فازها مؤثرتر از بقیهٔ دماهای اعمالی بوده است. نمونهٔ شمارهٔ ٦ که حاصل انجام عملیات پیرسازی بر نمونهٔ شمارهٔ ۲ است، نشان می‌دهد که با اعمال پیرسازی در دمای ۱۷۵ °C مساحت فازها و همچنین میزان کروی‌بودن آن‌ها کاهش می‌یابد. لازم به یادآوری است که این نمونه دارای بیشترین سختی اندازه‌گیری‌شده است. همچنین باتوجه‌به اهمیت فراوان میزان کروی‌بودن فازها در مباحث شکست و خستگی، بیشترین درصد میانگین کروی‌بودن فازها در نمونهٔ شمارهٔ ۸ مشاهده شد. تصویر میکروسکوپی این فازها در شکل ۸ برای نمونه‌های شمارهٔ ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

کسچینی (Ceschini) و همکاران [52]، در تحقیق خود به بررسی اندازهٔ ریزساختار آلومینیم بر خواص مکانیکی و خستگی آن پرداخته‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان داده است که با افزایش میزان سختی نمونه‌ها، عمر خستگی پرچرخه آن‌ها افزایش می یابد. همچنین نمونه‌هایی که دارای ریزساختار ریزتری نسبت به نمونه‌های دیگر بوده‌اند، خواص مکانیکی مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند. علت این رخداد کاهش تنش‌ها در فاز زمینهٔ آلومینیمی و در مجاور فازهای بین فلزی است. نتایج تحلیل‌های شکست نشان می‌دهد که بیشتر ترک‌های ریزساختار در نواحی مجاور فاز یوتکتیک سیلیسیم و آلومینیم–مس ایجاد می‌شود. نحوهٔ میزان حضور این فازها تأثیر بسزایی در مسیر رشد ترک دارد. ازاین‌رو، از نمونه‌های بررسی‌شده در این پژوهش می‌توان نمونه‌های شمارهٔ ۱۰ و ۱۱ را مناسب برای آزمون کشش و نمونهٔ شمارهٔ ٦ را مناسب برای آزمون خستگی پرچرخه پیشنهاد کرد. همچنین پیشنهاد می شود که نمونهٔ شمارهٔ ۵ در مقابل ایجاد و رشد ترک رفتار مناسب‌تری داشته باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۸ ریزساختار ماده برای (الف) نمونهٔ شمارهٔ ۱۰ و (ب) نمونهٔ شمارهٔ ۱۱

تحلیل حساسیت برای ریزساختار

در این بخش از این تحقیق مانند بخش قبل برای اندازهٔ فازهای محاسبه‌شده و همچنین میزان کروی‌بودن آن‌ها از

روش طراحی آزمون‌ها استفاده شده است. در ادامه، روابط به‌دست‌آمده براساس توابع هدف اندازهٔ فاز سیلیسیم و میزان کروی‌بودن آن در روابط (٦) و (٧) نشان داده شده است.

$$\mathrm{Area_{Si}} = -0.1706 + 0.48\ T_s - 0.00682\ T_a - 0.000007\ t_a - 0.00048\ T_s^2 \quad (٦)$$

$$\mathrm{Circularity_{Si}} = -589 + 2.35\ T_s - 0.00298\ T_a + 0.000881\ t_a - 0.00235\ T_s^2 \quad (٧)$$

همچنین، توابع رگرسیون برای اندازهٔ فاز آلومینیم–مس و میزان کروی‌بودن آن در روابط (٨) و (٩) مشاهده می‌شود.

$$\mathrm{Area_{Al_2Cu}} = 8357 + 33.5T_s - 0.0609\ T_a - 0.0179t_a + 0.0337T_s^2 - 0.00001t_a^2 \quad (٨)$$

$$\mathrm{Circularity_{Al_2Cu}} = 1535 - 6.19\ T_s + 0.00241\ T_a + 0.00338\ t_a + 0.00625\ T_s^2 - 0.00001\ t_a^2 \quad (٩)$$

دقت، میزان تأثیر و حساسیت هر یک از متغیرهای توابع به‌دست‌آمده را می‌توان در جدول‌های ۷ و ۸ مشاهده کرد.

جدول ۷ مقادیر دقت و حساسیت متغیرها در تابع رگرسیون برای پیرسازی با تابع هدف مساحت فاز سیلیسیم و درصد کروی‌بودن

Part	$Area_{Si}$		$Circularity_{Si}$	
	T-Value	P-Value	T-Value	P-Value
Regression	۴/۴۶	۰/۰۰۲	۶/۳۵	۰/۰۰۰
T_s	۰/۱۳	۰/۷۲۳	۴/۳۹	۰/۰۳۸
T_a	۷/۰۹	۰/۰۰۹	۱/۹۴	۰/۱۶۶
t_a	۰/۰۰	۰/۹۹۴	۱/۱۷	۰/۲۸۱
T_s^2	۰/۱۳	۰/۷۲۴	۴/۳۴	۰/۰۳۹
R^2	۱۰/۰۳		۱۳/۷۰	

جدول ۸ مقادیر دقت و حساسیت متغیرها در تابع رگرسیون برای پیرسازی با تابع هدف مساحت فاز آلومینیم–مس و درصد کروی‌بودن آن

Part	$Area_{Al_2Cu}$		$Circularity_{Al_2Cu}$	
	T-Value	P-Value	T-Value	P-Value
Regression	۵/۹۵	۰/۰۰۰	۱/۲۲	۰/۳۱۵
T_s	۱/۶۷	۰/۲۰۲	۲/۳۹	۰/۱۲۹
T_a	۱۳/۶۰	۰/۰۰۱	۰/۸۹	۰/۳۵۰
t_a	۱/۳۲	۰/۲۵۷	۱/۹۶	۰/۱۶۸
T_s^2	۱/۶۶	۰/۲۰۳	۲/۳۹	۰/۱۲۹
t_a^2	۰/۰۲	۰/۸۹۴	۲/۳۵	۰/۱۳۲
R^2	۳۸/۷۷		۱۱/۴۸	

از بررسی مقادیر، میزان تأثیر، حساسیت و دقت محاسبه‌شده برای توابع، اندازهٔ فاز و درصد کروی‌بودن آن‌ها مشخص شد که در تابع اندازهٔ فاز سیلیسیم فقط متغیر توان اول دمای پیرسازی تأثیر داشت، ولی برای درصد کروی‌بودن آن متغیرهای توان اول دمای انحلال و توان دوم آن تأثیر دارند و بیشترین تأثیر مربوط به توان اول دمای انحلال است. همچنین میزان دقت توابع رسم‌شده برای فاز سیلیسیم مقادیر کوچکی است که نشان می‌دهد رفتار این فاز از ماده را نمی‌توان به‌صورت تابع ریاضی نشان داد. در ادامه نتایج تحلیل رگرسیون برای فاز آلومینیم–مس نشان داد که اندازهٔ این فاز مانند فاز سیلیسیم فقط به توان اول دمای پیرسازی حساسیت دارد، درحالی‌که تابع میزان کروی‌بودن این فاز به متغیر خاصی حساسیت ندارد و بیشترین تأثیرگذاری در این تابع مربوط به متغیر توان اول دمای انحلال است. این رفتار می‌تواند به این دلیل باشد که دمای انحلال، محدوده‌های بالاتری نسبت به دمای پیرسختی دارد و در این حالت چون نفوذ بیشتری رخ می‌دهد، تغییرات فازی از قبیل انحلال برخی فازها مشهودتر است. بیشترین دقت به‌دست‌آمده در توابع ریزساختاری مربوط به اندازهٔ فاز آلومینیم–مس است، ولی به‌طورکلی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که رفتار ریزساختار ماده توانایی زیادی مانند سختی برای مدل‌سازی ریاضی ندارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر عملیات حرارتی با متغیرهای دمای انحلال، زمان انحلال، دمای پیرسازی و زمان پیرسازی روی آلیاژ آلومینیمی سرسیلندر خودروهای سواری (آلیاژ آلومینیم–سیلیسیم–مس)، با توابع هدف سختی و ریزساختار مطالعه شده است:

۱. نتایج تحلیل حساسیت و اندازه‌گیری تجربی نشان داد که تأثیر فرایند پیرسازی بر افزایش سختی بسیار بیشتر از فرایند انحلال است. توابع رگرسیون به‌دست‌آمده به‌کمک نرم‌افزار تحلیل آماری دقت خوبی را در پیش‌بینی میزان سختی نشان دادند؛

۲. بیشترین مقدار سختی در نمونه‌ای حاصل شد که در دمای ۵۱۰ °C انحلال و در ۱۷۵ °C پیر سازی شده بود و اندازه‌گیری شد؛

۳. کمترین مقدار سختی به‌دلیل افزایش مساحت فاز آلومینیم–مس، در نمونه‌ای که در دمای ۵۰۰ °C انحلال و در ۲۵۰ °C پیرسازی شده بود، اندازه‌گیری شد که این نتایج با پیش‌بینی توابع رگرسیون با دقت زیادی مطابقت دارد؛

٤. همهٔ عملیات‌های حرارتی انجام شده باعث کاهش اندازهٔ میانگین مساحت فاز سیلیسیم در آلیاژ شدند. کوچک‌ترین میزان مساحت اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌ها، مربوط به نمونه‌هایی بود که دما و زمان انحلال آن‌ها متفاوت بود، ولی دمای پیرسازی آن‌ها ۲۰۰درجه سانتی‌گراد بوده است؛

۵. تحلیل‌های ریزساختاری و مدل‌سازی ریاضی نشان می‌دهد که رفتار ریزساختار ماده، همچون کروی‌بودن فازها، قابلیت پیش‌بینی دقیق نسبت به خواص مکانیکی مانند سختی از طریق مدل‌سازی ریاضی را ندارد.

مراجع

1. Li, Z., Limodin, N., Tandjaoui, A., Quaegebeur, P., Witz, J.F., and Balloy, D., "Influence of Fe content on the damage mechanism in A319 aluminum alloy: Tensile tests and digital image correlation", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 183, pp. 94-100, (2017).
2. Menargues, S., Martin, E., Baile, M.T., and Picas, J.A., "New short T6 heat treatments for aluminium silicon alloys obtained by semisolid forming", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 621, pp. 236-242, (2015).
3. Azadi, M., Rezanezhad, S., Zolfaghari, M., and Azadi, M., "Effects of various ageing heat treatments on microstructural features and hardness of piston aluminum alloy", *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 92-98, (2019).
4. Beroual, S., Boumerzoug, Z., Paillard, P., and Borjon-Piron, Y., "Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 784, pp. 1026-1035, (2019).
5. Liu, G., Wang, Q., Liu, T., Ye, B., Jiang, H., and Ding, W., "Effect of T6 heat treatment on microstructure and mechanical property of 6101/A356 bimetal fabricated by squeeze casting", *Materials Science and Engineering: A*, Vol .696 ,pp. 208-215, (2017).
6. Li, B., Wang, X., Chen, H., Hu, J., Huang, C., and Gou, G., "Influence of heat treatment on the strength and fracture toughness of 7N01 aluminum alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 678, pp. 160-166,

(2016).

7. Aguilera Luna, I., Mancha Molinar, H., Castro Roman, M. J., Escobedo Bocardo, J.C., and Herrera Trejo, M., "Improvement of the tensile properties of an Al-Si-Cu-Mg aluminum industrial alloy by using multi stage solution heat treatments", *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 561, pp. 1-6, (2013).
8. Yu, W., Zhao, H., Wang, L., Guo, Z., and Xiong, S., "The influence of T6 treatment on fracture behavior of hypereutectic Al-Si HPDC casting alloy", *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 731, pp. 444-451, (2018).
9. Cecchel, S., Panvini, A., and Cornacchia, G., "Low solution temperature heat treatment of AlSi9Cu3(Fe) high-pressure die-casting actual automotive components", *Journal of Materials Engineering and Performance,* Vol. 27, pp. 3791-3802, (2018).
10. Bahmani, E., Abouei, V., Shajari, Y., Razavi, S., and Bayat, O., "Investigation on microstructure, wear behavior and micro-hardness of Al-Si/SiC nano-composite", *Surface Engineering and Applied Electrochemistry,* Vol. 54, pp. 350-358, (2018).
11. Vandersluis, E., Lombardi, A., Ravindran, C., Bois-Brochu, A., Chiesa, F., and MacKay, R., "Factors influencing thermal conductivity and mechanical properties in 319 Al alloy cylinder heads", *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 648, pp. 401-411, (2015).
12. Feng, J., Ye, B., Zuo, L., Qi, R., Wang, Q., Jiang, H., Huang, R., and Ding, W., "Effects of Ni content on low cycle fatigue and mechanical properties of Al-12Si-0.9Cu-0.8Mg-xNi at 350°C", *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 706, pp. 27-37, (2017).
13. Huang, H., Dong, Y., Xing, Y., Jia, Z., and Liu, Q., "Low cycle fatigue behaviour at 300 °C and microstructure of Al-Si-Mg casting alloys with Zr and Hf additions", *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 765, pp. 1253-1262, (2018).
14. Li, Z., Li, C., Liu, Y., Yu, L., Guo, Q., and Li, H., "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of Al–10%Mg2Si alloy", *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 663, pp. 16-19, (2016).
15. Garat, M., and Laslaz, G., "Improved aluminum alloys for common rail diesel cylinder heads", *AFS Transactions,* Vol. 115, pp. 89-96, (2007).
16. Pezda, J., "Effect of shortened heat treatment on the hardness and microstructure of 320.0 aluminium alloy", *Archives of Foundry Engineering,* Vol. 14, pp. 27-30, (2014).
17. Di Giovanni, M. T., Mørtsell, E. A., and Saito, T., "Influence of Cu addition on the heat treatment response of A356 foundry alloy", *Materials Today Communications,* Vol. 19, pp. 342-348,(2019).
18. Kores, S., Tonn, B., and Zak, H., "Aluminium alloys for cylinder heads", *Materials and Geoenvironment,* Vol. 3, pp. 307-317, (2008).
19. Nicolas, M., and Deschamps, A., "Characterisation and modelling of precipitate evolution in an Al-Zn-Mg alloy during non-isothermal heat treatments", *Acta Materialia,* Vol. 51, pp. 6077-6094, (2003).

20. Werenskiold, J.C., Deschamps, A., and Bréchet, Y., "Characterization and modeling of precipitation kinetics in an Al–Zn–Mg alloy", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 293, pp. 267-274, (2000).
21. Bardel, D., Perez, M., Nelias, D., Deschamps, A., Hutchinson, C. R., Maisonnette, D., Chaise, T., Garnier, J., and Bourlier, F., "Coupled precipitation and yield strength modelling for non-isothermal treatments of a 6061 aluminium alloy", *Acta Materialia*, Vol. 62, pp. 129-140, (2014).
22. Sepehrband, P., and Esmaeili, S., "Application of recently developed approaches to microstructural characterization and yield strength modeling of aluminum alloy AA7030", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 487, pp. 309-315, (2008).
23. Khan, I. N., Starink, M. J., and Yan, J. L., "A model for precipitation kinetics and strengthening in Al-Cu-Mg alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 472, pp. 66-74, (2008).
24. Lang, P., Povoden-Karadeniz, E., Falahati, A., and Kozeschnik, E., "Simulation of the effect of composition on the precipitation in 6XXX Al alloys during continuous-heating DSC", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 612, pp. 443-449, (2014).
25. Liu, S., Gao, M. C., Liaw, P.K., and Zhang, Y., "Microstructures and mechanical properties of AlxCrFeNiTi0.25 alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 619, pp. 610-615, (2015).
26. Zhang, X., Wang, H., Kuang, W., and Zhang, J., "Application of the thermodynamic extremal principle to phase-field modeling of non-equilibrium solidification in multi-component alloys", *Acta Materialia*, Vol. 128, pp. 258-269, (2017).
27. Ma, S., Maniruzzaman, M. D., MacKenzie, D. S., and Sisson, R. D., "A methodology to predict the effects of quench rates on mechanical properties of cast aluminum alloys", *Metallurgical Materials Transactions B*, Vol. 38, pp. 583-589,(2007).
28. Flynn, R. J., and Robinson, J. S., "The application of advances in quench factor analysis property prediction to the heat treatment of 7010 aluminium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 674-680, (2004).
29. Bates, C., "Quench optimization for aluminum alloys", *Transactions - American Foundrymens Society*, Vol.9, pp. 1045-1045, (1993).
30. Guzel, A., Jager, A., Ben Khalifa, N., and Tekkaya, A.E., "Simulation of the quench sensitivity of the aluminum alloy 6082", *Key Engineering Materials*, Vol. 424, pp. 51-56, (2010).
31. Toenjes, A., and von Hehl, A., "A fast method for predicting the mechanical properties of precipitation-hardenable aluminum alloys", *Metals*, Vol. 9, pp. 147, (2019).
32. Meyers, C., "Solution heat treatment effects on ultimate tensile strength and uniform elongation in A357 aluminum alloys", *AFS Transactions*, Vol. 94, pp. 511-518, (1986).
33. Ceschini, L., Morri, A., Morri, A., and Pivetti, G., "Predictive equations of the tensile properties based on alloy hardness and microstructure for an A356 gravity die cast cylinder head", *Materials and Design*, Vol. 32,

pp. 1367-1375, (2011).

34. Dieguez, J., Ares, J., and Marcos, M., "Multivariable analysis methods applied to variables optimisation in manufacturing processes", *International Journal of Manufacturing Research,* Vol. 2, pp. 171-178, (2007).
35. Roy, R. K., "Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement", John Wiley and Sons. Inc., New York, pp. 420-431, (2001).
36. Asghar, A., Raman, A., Aziz, A., and Daud, W. M. A. W., "A comparison of central composite design and Taguchi method for optimizing Fenton process", *The Scientific World Journal,* Vol. 2014, (2014).
37. Karaboga, D., and Kaya, E., "Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey", *Artificial Intelligence Review,* Vol. 52, pp. 2263-2293, (2019).
38. Azadi, M., Alizadeh, M., and Sayar, H., "Sensitivity analysis for effects of displacement amplitude and loading frequency on low-cycle fatigue lifetime in carbon/epoxy laminated composites", *MATEC Web Conference,* Vol. 165, pp. 22021, (2018).
39. Vembu, V., and Ganesan, G., "Heat treatment optimization for tensile properties of 8011 Al/15% SiCp metal matrix composite using response surface methodology", *Defence Technology,* Vol. 11, pp. 390-395, (2015).
40. Karthikeyan, L., and Senthil Kumar, V.S., "Relationship between process parameters and mechanical properties of friction stir processed AA6063-T6 aluminum alloy", *Materials and Design,* Vol. 32, pp. 3085-3091, (2011).
41. Safarloo, S., Loghman, F., Azadi, M., and Azadi, M., "Optimal Design Experiment of Ageing Time and Temperature in Inconel-713C Superalloy Based on Hardness Objective", *Transactions of the Indian Institute of Metals,* Vol. 71, pp. 156-172, (2018).
42. Garat, M., "Optimization of an aluminum cylinder head alloy of the AlSi7Cu3MnMg type reinforced by additions of peritectic elements", *International Journal of Metalcasting,* Vol. 5, pp. 17-24, (2011).
43. Belov, N.A., Eskin, D.G., and Aksenov, A. A., "Multicomponent Phase Diagrams, Applications for Commercial Aluminum Alloys", Elsevier, Amsterdam, pp. 83-132, (2005)
44. Azadi, M., "Analysis and improvement of a passenger car NVH behavior using DOE method", MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, (2008).
45. Qiu, X., Wang, J. Q., Tariq, N. U. H., Gyansah, L., Zhang, J. X., and Xiong, T. Y., "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of A380 aluminum alloy deposited by cold spray", *Journal of Thermal Spray Technology,* Vol. 26, No. 8, pp. 1898-1907, (2017).
46. Apichai, P., Kajornchiyakul, J., Pearce, J., and Wiengmoon, A., "Effect of precipitation hardening temperatures and times on microstructure, hardness and tensile properties of cast aluminium alloy A319", *Naresuan University Engineering Journal,* Vol. 6**,** pp. 2-7, (2011).
47. Hossain, A., and Kurny, A., "Effects of strain rate on tensile properties and fracture behavior of Al-Si-Mg cast alloys with Cu contents", *Materials Science Metallurgy Engineering,* Vol. 1, pp. 27-30, (2013).

48. Djebara, A., Zedan, Y., Kouam, J., and Songmene, V., "The effect of the heat treatment on the dust emission during machining of an Al-7Si-Mg cast alloys", *Journal of Materials Engineering Performance,* Vol. 22, No. 12, pp. 3840-3853, (2013).
49. Tabibian, S., Charkaluk, E., Constantinescu, A., Guillemot, G., and Szmytka, F., "Influence of process-induced microstructure on hardness of two Al-Si alloys", *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 646, pp. 190-200, (2015).
50. Montgomery, D. C., "Design and Analysis of Experiments", John Wiley and Sons. Inc., New York, pp. 532-585, (2017).
51. Tiwery, H., Hoziefa, W., El-Shabasy, A. B., and El-Mahallawi, I., "The Effect Of heat treatment on microstructure and mechanical properties of A356/ZrO_2 Nano reinforced composite", *Proceedings of the 18th International AMME Conference*, 3-5 April, Vol.18, pp. 1-13, (2018).
52. Ceschini, L., Morri, A., Toschi, S., and Seifeddine, S., "Room and high temperature fatigue behaviour of the A354 and C355 (Al-Si-Cu-Mg) alloys: Role of microstructure and heat treatment", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 653, pp. 129-138, (2016).